

「オマーン・サマイルオフィオライトと海洋地殻」

—海洋地殻の形成と熱水活動に関するモデリングへむけて—

川幡 穂高¹⁾・浦辺 徹郎²⁾・藤岡 換太郎³⁾

1. はじめに

科学技術振興調整費「海嶺におけるエネルギー・物質フラックスの解明に関する国際共同研究」(リッジフラックス計画)は、中央海嶺域から放出される熱エネルギーおよび物質フラックスを明らかにするために平成5年度にスタートした。すでに第1期の3年間(平成5~7年度)が経過し、東太平洋海膨、大西洋中央海嶺、およびマヌス海盆において物理探査手法によって海嶺の構造解析が行われ、海嶺における熱・物質フラックスが、海底下の地殻構造や熱水循環系の性質と密接に結び付いていることが明らかになってきている(Urabe *et al.*, 1995)。

この研究の第2期(平成8~10年度)には、第1期に行った広域調査を基に東太平洋海膨域で長期観測を実施するとともに、最終的なモデル化を行うことが目標とされ、2つの分科会が設置された。第一の分科会は主に海底面上の海水中の熱水ブリュームなどを、第二の分科会は海底下の海洋地殻形成機構を扱っている。

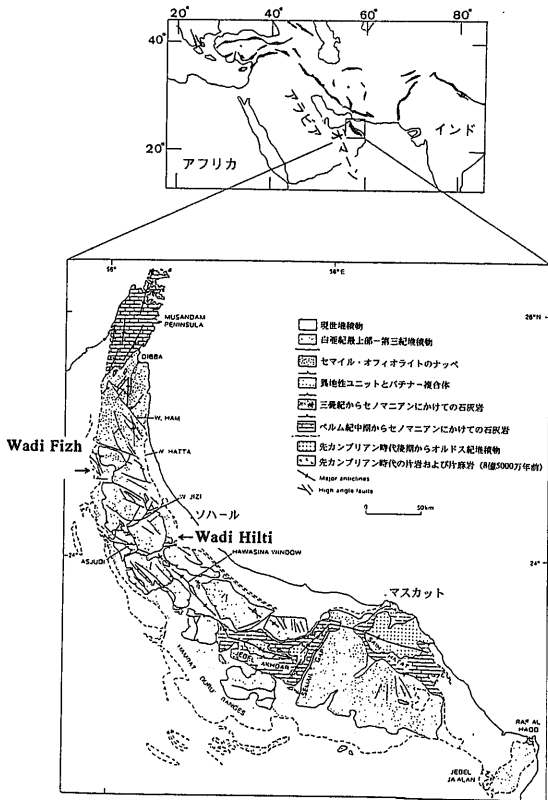
さて、オフィオライト中の熱水鉱床は、地質時代の海嶺(拡大系)の熱水活動によりもたらされたものであるが、熱水活動は海洋底の拡大系における海洋地殻の形成と密接な関係をもっている。そして、地殻の形成は、拡大軸付近でのマグマ溜りや上部マントルのダイナミクスと密接に結び付いている。そこで、第二の分科会の目標を達成するためには、海底面下の知見を集めることが必要であるが、これには二つの方法がある。一つは現在の海嶺での地震などを用いた物理探査、もう一つは掘

削、ドレッジあるいは潜水艇により岩石試料を採取することである。特に後者は、物質的側面から研究を行うために、非常に重要であるが、直接試料を回収する際には幾つかの制約がある。たとえば、枕状溶岩で代表される上部海洋地殻から連続コアを回収した掘削孔の中で、最も深い下部地殻を代表するものでもシート状岩脈群まで達しているにすぎない。一方、上部マントルまで達した掘削孔は断裂帯であつたり海洋地殻の厚さが異常に薄かったして、典型的な海洋地殻が分布する地域とは言い切れない。また、ドレッジによる方法では海底深所の試料を得るのが難しいのみならず、回収された試料の位置決め精度は低いものになってしまう。そこで、過去の海洋地殻の断面が地表に露出しているオフィオライトが研究対象として選ばれた。

世界で過去の海洋底の拡大系が陸上に露出しているものは数多いが、オマーンのサマイル・オフィオライト(Semail ophiolite)はキプロス島のトルードス・オフィオライト(Troodos ophiolite)とともに、その面的広がり、保存の良さからオフィオライト研究の対象として無二のものであろうと考えられる。そこで、リッジフラックス計画では1995年12月にサマイル・オフィオライトを調査した。現在、試料の分析・解析途中であるが、興味深い結果もでてきたので、平成9年3月7日に第246回地質調査所研究発表会「オフィオライト調査を通じた海洋地殻の研究—オマーン・サマイル・オフィオライト調査報告—」を開催した。ここではサマイル・オフィオライトの調査の概略と予察的結果について概要を述べ、オマーン国の現状と地質調査についてもふれる。

1) 地質調査所 海洋地質部
2) 地質調査所 首席研究官
3) 海洋科学技術センター 深海研究部

キーワード: オマーン, セマイルオフィオライト, 海洋地殻, 上部マントル, 中央海嶺, フラックス



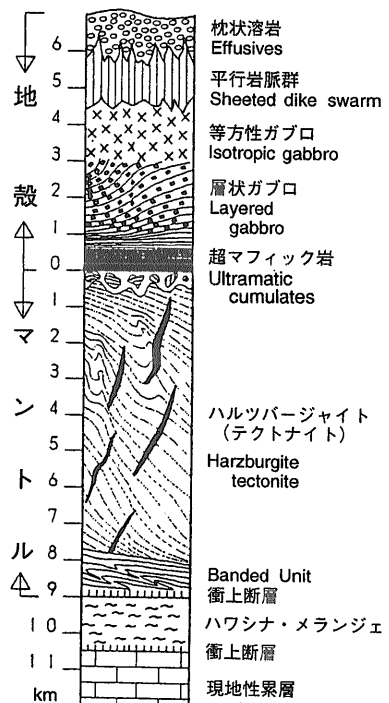
第1図 オマーン山脈の地質概略図(海野, 1991による).
調査地域は北部のWadi FizhとWadi Hilti地域.

2. オマーン北部のサマイル・オフィオライトの概略

アルプス山脈からトルコ, イランを経てインド-ヒマラヤ縫合帯に至る狭い帯状の地域はテーチス縫合帯(Tethys Suture)と呼ばれ, ジュラ紀から白亜紀に生じたオフィオライトが各地に分布している.

これらは Gondwana 大陸とユーラシア大陸の衝突によって消滅したテーチス海の一部であったと考えられている. その一つであるサマイル・オフィオライトはアラビア半島東端にあり, 海拔3,000mを超えるオマーン山脈を形成する延長475km幅約80kmの世界最大規模のオフィオライトである(第1図). ここでは地殻とマントルの厚さがそれぞれ7km, 縮めて総厚14kmに及ぶ海洋性プレートのほぼ完璧な層序が見られる(第2図).

サマイル・オフィオライトはおおよそ1億5千万年~1億年前にアフリカ-アラビア大陸とユーラシア大陸の間で拡大しつつあったテーチス海で生じた. 1



第2図 サマイル・オフィオライトの模式地質断面.

億年程前にアフリカ-アラビアとユーラシア大陸間の相対運動の変化によってテーチス海が閉じ出すと, この海洋プレートは2つに割れ, 拡大軸の南側にあったプレートが北方に向かって沈み込みを開始した. その結果, かつての拡大軸を含むプレートからなる北側の地塊は9,000万年前にはアラビア大陸と衝突し, さらにその上へののし上げていった. 衝突を続ける地塊は細かいブロックに分かれて現在のアラビア半島の東縁部にナップ群として乗り上げ, 3,000mを超えるオマーン山脈となった. 今もオマーン湾の海底にはこのプレートの残りが横たわっており, 北方のイランに向けて沈み込んでいる(海野, 1991).

3. 調査概要および結果

現地調査の前に地質(地殻構造, 岩石学, 変成岩, 熱水変質, 鉱化作用), 地球物理(地震探査, 岩石磁気), 地球化学(変質帯の同位体化学)的調査研究を行うための問題点などについて討議するため, 1994年2月に地質調査所で「海洋地殻そしてオフィオライト」という題でシンポジウムを行い, そ

第1表 調査団のリスト.

	期 間	参加者 (所属機関)
第一陣	12月12日から 12月29日	川幡徳高 (地質調査所), 木川栄一 (富山大学), 海野進 (静岡大学), 佐藤 暢 (筑波大学)
第二陣	12月16日から 12月29日	岸本清行 (地質調査所), 海宝由佳 (海洋科学技術 センター深海研究部), 荒井章司 (金沢大学), 石 塚英男 (高知大学), 千葉仁 (九州大学), 宮下純 夫* (新潟大学), 石井輝秋* (東京大学海洋研究所), 松影香子 (金沢大学), 中村優子 (富山大学)
第三陣	12月20日から1 2月29日	浦辺徹郎 (地質調査所), 藤岡換太郎 (海洋科学技 術センター深海研究部), 田中明子 (地質調査所), 小川勇二郎 (筑波大学)

*文部省関係経費で参加した者



写真1 調査団全員.



写真2 枕状溶岩.

の結果を「特集：海洋地殻のダイナミクス」として地学雑誌104巻3号にまとめた(荒井, 1995; 藤岡ほか, 1995; 石塚・鈴木, 1995; 川幡, 1995; 木川, 1995; Kinoshita, *et al.*, 1995; 松本, 1995; 小川, 1995; 末広, 1995; 海野, 1995; 浦辺, 1995).

これらの議論を基に, サマイル・オフィオライトの中からソハール周辺のWadi Hilti 地区(南側ルート)およびWadi Fizh地区(北側ルート)が調査地域

1997年8月号

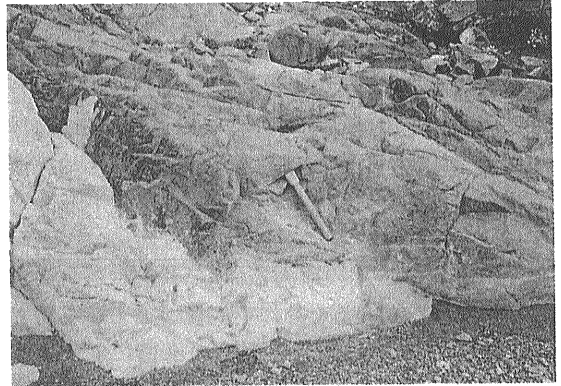


写真3 シート状岩脈最下部(灰色)とプラジオグラニット(斜長石花コウ岩)(白色).

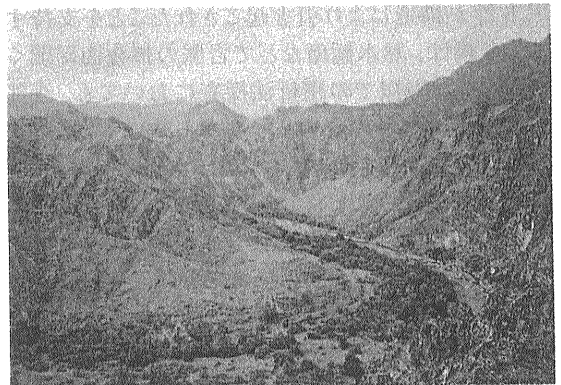


写真4 モホ境界付近の路頭. 右側の崖の中腹にモホ面が走っている. 川(Wadi)の左側はマンツルの岩石.

として選ばれ(第1図), 現地での長期間調査に従事した経験のある海野助教の案内により, 地質学的, 地球物理学的調査が行なわれた. 調査団のリストを第1表に示す(写真1).

露頭の状態は極めてよく, 海洋地殻の上部からマンツルにかけての断面, すなわち, 枕状溶岩(写真2), シート状岩脈, プラジオグラニット(写真3), ハンレイ岩相, モホ面(写真4), マンツル上部が連続的に観察でき, しかも, 4WDの車に入れるワジ沿いでも調査が十分行えたため, 短期間であったにもかかわらず詳細な観察と多くの試料を採取することができた.

前述したように, これらの試料の分析は現在進行中であるが, これまで得られたものの中から幾つかの結果について紹介する. オフィオライトと現在の海洋地殻の比較は, オフィオライトが現在の海洋地

殻を代表するものなのか、否かという問題に通じるので、様々な側面より比較研究が行われた。

地震波に関しては、オフィオライト岩体中の平行岩脈群層の地震波速度異方性が測定された。海洋性地殻第2層下部を海域調査で調査すると地震波速度の異方性が通常認められる。しかし、採取した岩石サンプルスケールでは異方性は顕著でなかった。そこで、異方性の原因とされる構造に依存する成分の検出を試みるために小規模な人工地震探査を実施し、シート状平行岩脈群の構造に依存する速度異方性の存在を明かにし、常圧下ではクラックが開きやすくなり、海底下に較べ異方性が増幅されている可能性があるものの、定性的には速度異方性が構造により引き起こされたことを支持する。今後は、熱水循環などで岩脈の接合面が弱くなりがちな海嶺での屈折法探査においても、浅部の速度異方性を考慮する必要があるとの見解に達した(Kaiho et al., 1996)。

磁気特性に関しては、オフィオライトの代表的セクション全体にわたって磁化強度が調べられた。サマイル・オフィオライトのシート状岩脈は平均 1.0Am^{-1} の磁化強度を示し、同岩脈が縞状磁気異常に対して寄与していることを示唆していた。この値はこれまで報告されているオフィオライトの平均的なシート状岩脈の値 (0.5Am^{-1}) より高いが、コストリカリフトの掘削孔504Bの値 (1.6Am^{-1}) より低かった。サマイル・オフィオライトのマントルペリドタイトの平均磁化速度はおよそ 3.0Am^{-1} で、この値は同岩相を100m程掘削したヘスディーブにおける平均値とほぼ一致していた。この高い磁化強度は同岩相の縞状磁気異常に対する寄与がかなりあることを示唆している(木川, 私信)。

岩石学的性質に関しては、オフィオライトと海洋底の岩石の違いとしてしばしば挙げられる特徴として、高クロム岩石がオフィオライトには普通に存在しているにもかかわらず、海洋底では未だ発見されていないという事実がある。この不整合性を説明するために、(1)オフィオライトの高クロム岩石ができたのは島弧的環境であった、(2)海洋底のマントルにも高クロム岩石は存在しているのだが今までの方法ではサンプリングできなかった、という二つの可能性が指摘されている。この問題を解決するため、現在サマイル・オフィオライトの岩石を詳細

に調べているが、最終的には海洋底のマントル部分を掘削することが不可欠である(荒井, 私信)。

この問題とも関連してセマイル・オフィオライトの海嶺起源の当否と海洋の最上部マントルにおけるメルトの振る舞いを明らかにするために、東太平洋海膨のヘス・ディーブ(Hess Deep)とサマイル・オフィオライトのモホ遷移帯で得られたかんらん岩やハンレイ岩が岩石学的に検討された。その結果ヘス・ディーブのハンレイ岩の輝石やクロムスピネルはコンパティブル元素(クロム, マグネシウムなど)がほとんど一定であるにもかかわらず、チタン酸化物(TiO_2)含有量は増加し、Nタイプ中央海嶺玄武岩(MORB)よりも高くなっていた。これはより深部起源の初成的なMORBが上昇する際に、壁のかんらん岩と相互作用(溶融+晶出)することによって形成された可能性が高いと解釈された。また、サマイル・オフィオライトのモホ遷移帯の岩石はヘス・ディーブのものと同様であり同様のプロセスで形成されたものと推定された。しかし一方で、オフィオライトのモホ遷移帯以深のマントルかんらん岩の鉱物化学組成は海嶺起源のものとは一致せず、島弧又は前弧的な特徴を示すものもあった。このようにモホ遷移帯からみたサマイル・オフィオライトは海嶺の条件を満たしているものの、マントルの岩石に関しては幾つかの課題が残されていると考えられる(松影・荒井, 私信)。

マグマ溜りに関しては、それが固化したものと考えられるハンレイ岩層が岩石学的に研究された。ワジフィズ(Wadi Fizh)地域に分布するハンレイ岩層には、ほぼ中心部に背斜・向斜構造が存在しており、背斜構造の中心付近には、シート状岩脈と類似した岩脈群が発達していることが観察された。これは、海嶺伝播に伴い既存の海洋地殻を破壊して前進していったマグマ溜りの先端を示している可能性が指摘された。そして、層状ハンレイ岩の最下部約400mにおいて鉱物組成を検討した結果、下部から上部へ向かってより分化した組成へと変化し、少なくとも6つのユニットが識別された。また、斜長石は普遍的に逆累帯構造を示すことが明らかとなる一方、海洋地殻層序を切って貫入しているウエールライト、さらにそれを切って貫入しているハンレイ岩という、少なくとも三回の火成作用が識別された(足立・宮下, 私信)。

現在の海底との対比の他に、オフィオライト間の比較も行われた。重複岩脈の形成条件に関する研究では、キプロス島のトルードス・オフィオライトとサマイル・オフィオライトが詳細に検討された。トルードス・オフィオライトでは多数の重複岩脈が深成岩体近辺で見出されたのに対し、溶岩層付近ではほとんどが単純岩脈であった。一方、サマイル・オフィオライトでは単純岩脈のみが見られた。これらの違いは以下のようにして説明された。すなわち、トルードス・オフィオライトの重複岩脈の急冷縁の厚さから、マグマの貫入間隔は数時間から十数時間と推定され、マグマ溜り付近では高温のため岩脈の冷却速度が遅く、岩脈中心が十分な強度を得る前に、次のマグマパルスが発生するため重複岩脈が深成岩体近傍でのみ卓越すると考えられた。一方、サマイル・オフィオライトでは、トルードスに比べてマグマ溜りが大きく、複数のマグマパルスを発生するだけの余剰圧を生じなかったため重複岩脈が見出されないと解釈された(海野, 私信)。

蛇紋岩に関してサマイル・オフィオライト、トルードス・オフィオライト、現在の海洋底が比較された。トンガ前弧域には蛇紋岩海山は存在しないものの、上部マントル及び下部から上部地殻に至る地質断面が露出し、サマイル・オフィオライトに類似していたが、伊豆—小笠原—マリアナ前弧域には蛇紋岩化したマントルカンラン岩(ハルツバージャイト)を主体とする非火山性の海山が海溝にほぼ平行に分布しており、これはトルードス・オフィオライトと類似していると指摘された(石井, 私信)。

熱水活動や変質に関しては、酸素同位体とストロンチウム同位体の情報が有用である。ワジフィズ(Wadi Fizh)に沿って当時のモホ面から海底面までの断面について連続的に岩石を採取し、ストロンチウムの同位体を分析した結果によると、ドレイトの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は0.705付近のものが多く、高温で海水と反応したことを示していた。エピソードは完全に変質鉱物から構成されており、当時の熱水の組成を反映しているものと考えられ、その $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は約0.7043で熱水が低い水/岩石比で形成されたことを示唆していた(川幡・野原, 私信)。一方、酸素同位体比に関しては、ハンレイ岩層の $\delta^{18}\text{O}$ 値は中央海嶺玄武岩(MORB)のそれに比べて著しく低く、ハンレイ岩層全体にわたって高

温の熱水との相互作用が起こったことを示していた。一方、シート状岩脈群と枕状熔岩の $\delta^{18}\text{O}$ 値は、MORBの値よりも高く、熱水活動末期の低温の熱水変質が海底風化の影響を最終的に記憶していると考えられた。以上のことから、海洋地殻全体に熱水が侵入していたことは明らかで、サマイル・オフィオライトの他のセクションからこれまで報告されている酸素同位体プロファイルとの比較から、今回岩石を採取したセクションはトランスフォーム断層に近かったと示唆された(千葉, 私信)。

熱水活動は海底面付近にしばしば熱水鉱床をもたらす。現在幾つかの鉱床が知られているが、これらは通常オフィオライト岩体の層準の上部に位置している。衛星による可視画像(J-ERS-1/OPSおよびLANDSAT/TM)に、無相関ストレッチ処理を行うと、オフィオライトの主要な岩相と画像の色の間に対応がつけられることが明らかとなった。この方法を用いると過去の熱水活動の分布はマグマ溜りがあった海嶺部のみ見られる。一方、オフィオライト中の過去のマグマ溜りの存在は地形的に検知できるので、オフィオライトの地形と昔海底にあった時の熱水活動との間に規則性を見いだすことができる。そこで、将来はこの方法を発展させて資源探査が可能であることがわかった(田中・浦辺, 私信)。

4. オマーン国の現状と地質調査

オマーンは1970年に現在のカブース国王が政権を担ってから急速に発展し、従来の鎖国政策を捨てて積極的な開国政策を展開している。イスラム国家であるので治安はよく、清潔でゴミもほとんど落ちていなかった。全人口は200万人で、首都マスカットの政府機関などが集まっている地域は近代である。高速道路は北部の海岸にそって走っており、その南にオフィオライトがひろがっている。オフィオライト地域は岩石砂漠で植生は発達せず、前にも述べたように全面露頭に恵まれている。特に、超塩基性岩が分布する地域では、変質して蛇紋岩になりくずれやすいのと、超塩基性岩には重金属成分が多く含まれ、それが植物の育成を抑制しているのが原因と考えられる。マスカットから調査地域の拠点であるソハールへは車で1時間位であっ



写真5. 石油鉱物資源省でのミニシンポに参加された香田忠雄大使(右), 浦辺(左), 川幡(中央).

だが、高速道路の両側は石灰岩などを主体とした堆積岩が分布し、灌漑された所では農業が行われている。私達が訪れた1995年の冬は例外的にほぼ毎日夕立ちにみまわれたが、通常は晴天の日が何日も続き、雨も降らないらしい。砂漠地帯では3月から10月にかけては40度以上にまで気温が上昇するので、最高気温がせいぜい30度位の11月から2月までが地質調査に適していると言える。

オフィオライトが分布する地域は主要幹線道路より少しはいるため道路は舗装されていない。そこで、4輪駆動車がないと身動きがとれない。一方、4輪駆動車は涸川(ワジ)の中をほぼ自由に走り回れるので露頭へのアクセスは非常によかった。現地には放牧のための柵や立入り禁止地区もほとんど無く、能率の良い調査が可能であった。調査地域の住民は人なつこく、友好的であった。

1995年の調査は当初予想していた以上の成果を

あげることができた。これは、オマーン国石油鉱物資源省、在オマーン日本大使館、および現地で地質調査を指導してこられたJICA専門家の方々におうところが大きい。オマーンへの入国に際しては、ビザに相当するNOC (No Objective Certificate) が必要だが、今回は石油鉱物資源省が責任をもって引き受け人になってくれた。オマーンの基幹産業は原油産出なので、同省は政府の中で主要な地位を得ているとのことであった。また、鉱山見学、調査地域についての基礎資料についても便宜をはかっていただいたほか、採取試料の国外への持ちだしに関しても空港の税関に折衝していただいたためトラブルは一切なかった。現地調査の終了後、石油鉱物資源省にて、このプロジェクトの目的などに関連してミニシンポジウムを開催し(写真5)、藤岡が「日本のリッジ研究」について、浦辺が「海底熱水活動による鉱化作用」について講演した。同省には国際協力事業団から派遣されていた川村和太氏がおられたが、石油鉱物資源省幹部の信任が厚く、資源省との折衝、オマーンでの生活の基本、宿やレンタカーの手配までお世話になった。また、この10年以上にわたりオマーン国北部の地質図および資源探査に関わってきた柴田芳彰氏をはじめとする大手開発(株)の方々も石油鉱物資源省から信頼されており、私達の調査もこれらの人々の努力を基礎としてできたと考えている。

在オマーン日本大使館については、入国以前から同国の生活などについて情報をいただいていたが、石油鉱物資源省への働き掛けのほか、第一陣の到着時に空港でお世話いただいた。特に、調査



写真6
香田忠雄大使公邸でのパーティー。

終了時に香田大使公邸で、調査団のために石油鉱物資源省の方々に招待し、公邸でガーデンパーティーを開いて下さった(写真6)。現在オマーンの石油の四割が日本向けで、オマーンで作られたインゲン豆、なつめ椰子などが日本人の口に入っているが、脱石油を国策とするオマーンは液化天然ガスを日本向けに輸出することを切望し、農漁業振興、輸出向け工業産業の育成が進行中である。大使は、科学技術面での交流が長い目でオマーン国の発展に貢献するとお考えになり、その基礎を築くことを目標とされ、今後とも継続してオマーンを訪問して欲しいと述べられた。それを受けて、1996年3月佐藤壮郎地質調査所長(当時)が同国を訪問したことを契機に、現在「オマーン国のサマイルオフィオライトにおける貴金属鉱化の潜在性と資源探査手法の開発に関する研究」(研究代表者、地質調査所鉱物資源部小笠原正継)という工業技術院国際特定共同研究が平成9年度より始まった。

今回のオマーン調査は、専門を異にする国立研究所や大学の研究者が相互に関連をもって、大規模なオフィオライトの研究を進めることができる出発点となったと考えられる。平成9年度もリッジフラックス計画に関連した調査が予定されている。また、文部省関連では、科学研究費補助金(国際学術研究)で「海洋地殻生成のダイナミクス—オマーンオフィオライトを例として—」(研究代表者、宮下純夫教授)が平成9年度から開始された。今後このような研究交流が更に発展することを願っている。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費「海嶺におけるエネルギー・物質フラックスの解明に関する国際共同研究」の成果の一部である。オマーン国との地球科学的研究の発展で、香田忠雄大使をはじめとする日本大使館の皆様にお世話になった。また、調査の遂行にあたり、川村和太氏、大手開発の方々に世話になった。また、サマイル・オフィ

オライト調査ではカシム博士、ヒラル博士をはじめとする石油鉱物資源省の方々に便宜をはかっていただいた。また、有田正史統括研究調査官に原稿を査読していただき原稿が改善された。ここに感謝します。

引用文献

- 藤岡換太郎・田中武男・青池 寛(1995)：伊豆・小笠原、マリアナ前弧の蛇紋岩海山—潜水調査船による観察と陸上蛇紋岩帯との関連—。地学雑誌, 104, 473-494。
- 石塚英男・鈴木里子(1995)：オフィオライト変性作用と海洋底変性作用。地学雑誌, 104, 350-360。
- 荒井章司(1995)：海洋リソスフェアとオフィオライト；類似点と相違点。地学雑誌, 104, 361-380。
- Kaiho, Y., Kisimoto, K., Tanaka, A. and Warsi, W.E.K. (1996)：Seismic velocity anisotropy of sheeted dike at the Oman ophiolite complex. EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, 77, 497。
- 川幡穂高(1995)：海嶺大軸とオフィオライトにみられる熱水循環系。地学雑誌, 104, 449-467。
- 木川栄一(1995)：地球地殻の磁化：海洋地磁気縞状異常の起源について。地学雑誌, 104, 381-391。
- Kinoshita, H., Nakasa, Y., Morijiri, R. and Fujiwara, T. (1995)：Formation of Backarc Basin and Genesis of Ophiolite. 地学雑誌, 104, 392-407。
- 小川勇二郎(1995)：プレート沈み込み境界付近でのオフィオリティックな岩石のエンプレイスメントの問題点。地学雑誌, 104, 468-472。
- 松本 剛(1995)：海洋地殻と重力異常。地学雑誌, 104, 428-437。
- 末広 潔(1995)：海洋地殻の地震学的性質。地学雑誌, 104, 408-427。
- 海野 進(1995)：北部オマーン山脈サマイル・オフィオライトの地質。地学雑誌, 104, 321-349。
- 海野 進(1991)：オマーン北部のサマイル・オフィオライトの地質。静岡地質, 63, 1-3。
- 浦辺徹郎(1995)：西太平洋の島弧・縁海系海底熱水活動—現在と過去—。地学雑誌, 104, 438-448。
- Urabe, T. et al. (1995)：The effect of magmatic activity on hydrothermal venting along the superfast-spreading East Pacific Rise. Science, 269, 1092-1095。

KAWAHATA Hodaka, URABE Tetsuro and FUJIOKA Kantaro (1997)：Semail ophiolite in Oman and oceanic crust—modeling for the formation of oceanic crust and the related hydrothermal activity—。

<受付：1997年6月6日>